해수면온도가 태풍강우 최대화에 미치는 영향

Effect of Sea Surface Temperature on Maximizing Typhoon Rainfall Depth

최정현* · 이옥정** · 장수형*** · 조덕준**** · 김상단*****

Choi, Jeonghyeon* · Lee, Okjeong** · Jang, Suhung*** · Jo, Deok-Jun**** · Kim, Sangdan*****

Abstract

In this study, the WRF (Weather Research and Forecast) model was used to maximize typhoon rainfall depth by changing the sea surface temperature (SST) and relative humidity in the initial and boundary conditions. The effects of SST on maximizing typhoon rainfall depth were analyzed. Typhoon MAEMI's rainfall depth, which was numerically reproduced by pre-study, was maximized by increasing the amount of water vapor entering the typhoon. For this, the relative humidity of the initial and boundary conditions of the model was fixed at 100 %, and the typhoon rainfall was simulated by increasing SST from 0.0 °C to 5.0 °C. The simulation of typhoon rainfall under various SSTs indicates that the spatial distribution of the simulated total rainfall depth varies with increasing SST. In particular, it can be seen that the change in SST greatly affects the rain falling on the land. In addition, it is found that the total rainfall depth on land and changes in SST do not exhibit a linear relationship. Therefore, it is necessary to investigate the optimal increase in SST in accordance with the target typhoon by carrying out repeated numerical experiments using various SST conditions, rather than unconditionally increasing SST to maximizing typhoon rainfall depth.

Key words : Sea Surface Temperature, Typhoon MAEMI, Typhoon Rainfall Maximization, WRF Model

요 지

본 연구에서는 태풍 매미를 대상으로 WRF (Weather Research and Forecast) 모형을 이용하여 초기 및 경계조건의 해수면온도 및 상대습도의 변경을 통해 태풍 강우량을 최대화하고, 해수면온도가 태풍 강우량의 최대화에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 사전연구를 통해 수치적으로 재현된 태풍 매미를 기반으로, 태풍으로 유입되는 수증기량을 증가시켜 태풍강우를 최대화하고자 하였다. 이를 위하여 모형의 초기 및 경계조건 중 상대습도를 100 %로 고정하고 해수면온도를 0.0 °C에서 5.0 °C까지 증가시켜가며 태풍 강수량이 모의되었다. 모의된 태풍의 강우를 살펴본 결과, 해수면온도의 증가에 따라 모의된 총 강우량의 공간적인 분포가 매우 다양하게 나타났으며, 특히 해수면온도의 변화는 육지에 떨어지는 강우량에 많은 영향을 미치는 것을 살펴볼 수 있었다. 또한, 해수면온도의 증가와 육지에 떨어지는 강우량은 선형적인 관계를 나타내지 않는 것으로 나타났다. 따라서 태풍강우 최대화를 위해서는 무조건적으로 해수면온도를 증가시켜 WRF를 구동하기 보다는 다양한 조건에 대한 수치실험을 반복하여 모의하고자 하는 태풍에 가장 적합한 최적 해수면온도 증가량을 탐색할 필요가 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 해수면온도, 태풍 매미, 태풍강우 최대화, WRF 모델

*정회원, 부경대학교 지구환경시스템과학부(환경공학전공) 박사과정(E-mail: jeonghyeon202@naver.com)

Member, Graduate Student, Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University

**정회원, 부경대학교 지구환경시스템과학부(환경공학전공) 박사과정(E-mail: lover1804@nate.com)

Member, Graduate Student, Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University

***정회원, K-water 융합연구원 물순환연구소 책임연구원(E-mail: Kwaterjang@kwater.or.kr)

Member, Principal Researcher, Water Resources Research Center, K-water Institute

****정회원, 동서대학교 건축토목공학부 교수(E-mail: water21c@gdsu.dongseo.ac.kr)

Member, Professor, Division of Architecture & Civil Engineering, Dongseo University

*****교신저자, 정회원, 부경대학교 환경공학과 교수(Tel: +82-51-629-6529, Fax: +82-51-629-6523, E-mail: skim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

1. 서 론

PMP는 특정지역에서 특정기간 동안 물리적으로 발생할 수 있는 최대강수량으로 정의된다(WMO, 1986). 현재 PMP 산정을 위해 가장 널리 적용되고 있는 방법은 수분최대화 기법을 기반으로 강우를 최대화시키는 수문기상학적 방법이다(Lee et al., 2016). 해당 방법은 장기간에 걸쳐 관측된 강우 자료를 기반으로, 강우, 이슬점 및 풍속과 같은 관측 기상변수와와 단순한 물리적 관계를 통계적으로 고려하여 강우량을 최대화 하는 방법이다. 그러나 기존의 PMP 산정방법은 관측 자료에 지나치게 의존하는 문제점이 있다(Papalexiou and Koutsoyiannis, 2006). 또한 기상 변수간의 단순한 물리적 관계는 실제 복잡한 대기 및 강우의 프로세스들을 적절하게 설명하지 못 할 가능성이 있다(Abbs, 1999).

이러한 기존 PMP 산정방법의 한계점을 보완하고자 최근 물리기반의 수치기상모형을 이용하여 PMP를 산정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, Ohara et al. (2011) 및 Ishida et al. (2015a, 2015b, 2018)의 연구에서 물리기반 수치기상모형의 동역학적 다운스케일링 기법을 이용하여 기상요소의 이동, 상대습도의 최대화, 기온의 증가 등을 조합하여 강우를 최대화 하는 방법이 개발되었다. 국내에서도 태풍 루사(RUSA)를 대상으로 수치기상모형인 WRF (Weather Research and Forecast) 모형을 이용하여 기상요소의 변화를 통해 PMP를 산정하는 연구가 수행되었다(Lee et al., 2017). 이와 같은 연구들은 모두 공통적으로 과거 발생한 강우사상을 선택하고 재현한 후 모형의 초기 및 경계 조건의 기상요소들을 변경하여 강우를 최대화하는 방법을 적용하고 있다. 이 경우, 물리기반의 수치기상모형을 통해 대기의 복잡한 프로세스를 적절하게 고려할 수 있으며, 기존의 PMP 산정 방법에 비하여 상대적으로 관측 자료에 대한 의존도가 낮다(Ishida et al., 2018).

우리나라의 경우, 태풍으로 인한 자연재해 피해가 가장 큰 것으로 나타나고 있다(Lee and Chang, 2009; Ryu and Cho, 2010). 또한 기후변화로 인해 해수면온도의 증가가 지속될 경우, 서태평양에서 생성되는 태풍의 강도가 점차 증가할 가능성이 있다(NIMR, 2009; WMO, 2012; Laliberte et al., 2015; Tsuboki et al., 2015). 또한, 한반도 주변 수역의 해수면온도가 점차적으로 증가함에 따라(NIMR, 2009), 육지 상륙 직전까지 해상에서 지속적으로 에너지를 공급받음으로써 더 큰 강우를 발생시킬 가능성이 있다. 실제로 과거 태풍 루사(RUSA), 매미(MAEMI) 그리고 차바(CHABA)의 경우에도 평년보다 높은 해수면온도로 인해 태풍이 세력을 유지하며 상륙하여 우리나라에 큰 피해를 입혔다.

이에 본 연구에서는 물리적인 PMP 산정을 위해 물리기반의 수치기상모형인 WRF 모형을 이용하여 과거 강우 사상 중 태풍을 대상으로 강우최대화를 수행하고, 이때 해수면온도가 태풍강우 최대화에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 Choi et al. (2018)에서 WRF 모형을 이용하여 다양한

초기 및 경계조건의 개선을 통해 재현된 태풍 매미를 기반으로 연구를 진행하였다. 초기 및 경계조건 중 해수면온도 및 상대습도의 변경을 통해 태풍강우를 최대화 하고자 하였으며, 태풍강우의 발생에 큰 영향을 미치는 해수면온도를 0.0 °C에서 5.0°C까지 증가시켜 해수면온도 변화에 따른 태풍강우량의 민감도를 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 대상 태풍 및 모델 구성

본 연구에서는 Choi et al. (2018)에서 재현된 태풍 매미를 기반으로 연구를 수행하였다. 해당 연구에서는 수치기상모형인 WRF 모형을 이용하여 초기 및 경계조건의 개선 및 태풍초기화 기법을 통해 태풍 매미의 강우를 재현하였다.

이에 본 연구에서는 Choi et al. (2018)에서 태풍 매미의 강우사상이 가장 우수하게 재현된 초기 및 경계조건을 사용하여 태풍최대화를 수행하고자 하였으며, 해당 연구와 동일한 모델 구성과 물리옵션을 이용하였다. 모의기간은 UTC 기준 2003년 9월 11일 0시부터 14일 0시이며, 도메인의 경우 태풍의 상륙 방향과 주요 강우발생 지점을 고려하여 설정하였다. 도메인 1(D01)의 경우, 27 km의 수평해상도를 가지며 98 × 127의 격자로 구성하였다. 도메인 2(D02)와 도메인 3(D03) 또한 각각 9 km와 3 km의 수평해상도와 함께 208 × 211, 256 × 292의 격자로 구성되었다(Fig. 1 참고). 물리옵션은 Choi et al. (2018)에서 다양한 수치실험을 통해 탐색된 가장 최적화된 옵션을 그대로 적용하였다. 태풍의 경로 및 강우의 시공간적 분포에 큰 영향을 미치는 주요 물리옵션인 Microphysics, Cumulus parameterization, Planetary boundary layer에는 각각 Ferrier (new Eta) microphysics operational High-Resolution Window, Betts-Miller-Janjic scheme, Yonsei University scheme이 적용되었다. Fig. 2는 Choi et al. (2018)에서 재현된 전국의 누적강우 분포와 영남 지역의 공간평균 강우시계열이다.

2.2 태풍강우 최대화 기법

우리나라로 상륙하는 태풍은 일반적으로 서태평양의 해상으로부터 에너지를 공급받아 세력을 확장하며 북상한다. 만약 태풍에 더 많은 수증기가 유입된다면, 태풍은 더 많은 강우를 발생시킬 가능성이 높다. 높은 해수면온도는 태풍으로 공급되는 수증기의 양을 증가시켜 태풍과 태풍강우의 강도 증가에 영향을 미치는 주요한 요소이다. 특히, 우리나라의 경우 3 면이 바다로 둘러싸여 있기 때문에 한반도 주변의 해수면온도가 우리나라에 상륙하는 태풍의 위력에 미치는 영향이 클 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 상대습도와 해수면온도를 증가시켜 태풍강우를 최대화하고자 하였다. 높은 상대습도는 발생되는 강우량을 증가시킬 것이며, 해수면온도는 태풍으로

Fig. 1. WRF Model Configuration (Choi et al., 2018)

Fig. 2. Comparison of Observed and Simulated Total Accumulated Rainfall Depth and Hourly Rainfall Time Series (Choi et al., 2018).

공급되는 수증기량을 증가시키고 추가적으로 대기의 포화 수증기량 증가에도 영향을 미칠 가능성이 있다. 특히, 지구온난화에 따른 해수면온도의 상승은 태풍의 세력 강화에 주요한 영향을 미치기 때문에, 기후변화 하에서 해수면온도의 증가는 앞으로 발생 가능한 극한강우 추정에 중요한 사항이

될 수 있다.

이에 우선적으로 태풍의 진행방향과 시간을 고려하여 태풍이 북상하는 도메인 3의 하단 경계조건 중 상대습도를 100 %로 설정하였다(Fig. 3b 참고). 그러나 상대습도의 최대화만으로는 강우의 물리적인 상한인 PMP를 생성하기에는

Fig. 3. Change of Initial and Boundary Conditions for Increase of Sea Surface Temperature and Maximization of Relative Humidity

Table 1. Relative Humidity Bottom Boundary Condition Modification

Time	before 2003-09-11 06:00	2003-09-11 06:00	2003-09-11 12:00	2003-09-11 18:00	2003-09-12 00:00	2003-09-12 06:00	after 2003-09-12 06:00
Relative Humidity	original condition	100%	100%	100%	100%	100%	original condition

무리가 있기에, 추가적으로 해수면온도를 증가시키고자 모든 도메인의 초기 및 경계조건 내 해수면온도를 증가시켰다 (Fig. 3a 참고). 이로써 태풍으로 유입되는 수증기량을 더욱 증가시켜 한반도에 발생하는 강우량을 최대화하고자 하였다. 참고로, 별도의 실험 결과, 전체 도메인의 경계조건에 대해 상대습도를 100 %로 설정하여 모의할 경우, 태풍 내 수증기가 일찍 포화되어 태풍이 한반도에 상륙하기 전 동중국해 해상에 대부분의 강우를 과다하게 발생시켰다. 이로 인해 육지에 발생하는 강우가 매우 적은 것으로 나타났다. 이에 태풍이 한반도 상륙 전 해상에 대부분의 강우를 발생시키는 것을 방지하기 위해 태풍 경로 및 진행속도를 고려하여 Table 1과 같이 특정 시간에 대해 도메인 3의 경계조건의 상대습도를 100 %로 설정하였다.

태풍 최대화를 위해 본 연구에서 수행한 자세한 절차는 Fig. 4와 같다. 우선, 각 도메인의 초기 및 경계조건의 해수면온도를 증가시킨 후, 도메인 1과 2를 모의한다. 그 후 모의된 도메인 2의 결과 중 도메인 3의 하단 경계조건에 해당하는 격자의 상대습도를 100 %로 설정하여, ndown 기법을 통해 도메인 3의 새로운 경계조건을 생성하고 모의한다. 참고로, ndown 기법은 상위 도메인의 결과를 이용하여 하위 도메인의 경계조건을 새롭게 생성하는 기법이다.

Fig. 4. Flow Chart

2.3 민감도 분석 및 최대강우량 산정

합리적인 해수면온도 변화량을 적용하기 위해 수문기상학적 PMP 산정 방법 중 수분최대화 기법을 참고하여 해수면온도 변화량을 산정하였다. 이슬점이 높아질 경우 대기의 포화수증기량이 증가하기 때문에 같은 조건이라 하더라도

발생 가능한 강우량이 증가한다. 기존 PMP 산정 방법의 수분최대화 기법은 실제 이슬점과 최대 이슬점의 차이를 고려하여 강우를 최대화한다. 다시 말해, 특정 호우기간의 이슬점이 최대이슬점이었을 경우 발생 가능한 강우를 추정하여 강우를 최대화 한다.

이에 본 연구에서 먼저 부산지점의 태풍 매미기간의 12-시간 지속 호우대표이슬점과 부산지점의 100년 빈도 12-시간 지속 최대이슬점의 차이를 분석하였다. 이때, 상대습도가 100 %일 경우 이슬점은 기온과 동일하기에 이슬점의 차이는 곧 기온의 차이로 설명할 수 있다. 따라서 부산 주위의 울산, 거제, 통영 지점의 관측 부이자료를 이용하여 8월 및 9월의 일평균 기온(SAT , $^{\circ}C$)과 해수면온도(SST , $^{\circ}C$) 사이의 선형관계($SST = \alpha \cdot SAT + \beta$)를 분석하였다. 이를 통해 이슬점 차이에 따른 해수면온도의 증가량을 추정하였다.

부산지점의 태풍 매미 기간의 12-시간 지속 호우대표이슬점(약 $22.6^{\circ}C$)과 1982년부터 2016년까지 관측된 이슬점 자료를 이용하여 계산된 100년 빈도 12-시간 지속 최대이슬점(약 $27.1^{\circ}C$)의 차이는 약 $4.5^{\circ}C$ 로 나타났다. 또한, 부산지점 주위의 울산, 거제, 통영 부이자료(관측개시일 - 2016년)를 이용하여 기온과 해수면온도의 선형관계를 분석한 결과, 기울기가 0.70(결정계수는 0.65)로 산정되어, 상대습도 100 %하에서 이슬점을 고려한 해수면온도의 증가량은 약 $3^{\circ}C$ 로

나타났다.

이와 더불어 본 연구에서는 해수면온도가 태풍강우최대화에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 상대습도는 100 %로 고정하고 해수면온도를 $0^{\circ}C$ 에서 $5^{\circ}C$ 까지 $0.5^{\circ}C$ 씩 증가시켜, 총 11번의 수치실험을 통해 해수면온도의 증가가 따른 총 강우량 및 강우의 공간분포에 미치는 영향을 살펴보았다 (Table 2).

최종적으로 수치기상모형을 이용하여 태풍강우 최대화 기법의 적용을 통해 태풍 매미의 주요 피해지역인 영남지역 중 부산지점에 대해 영향면적 $27 km^2$ 의 지속기간별 가능최대 강우량을 산정하고, 이를 Lee et al. (2016)에서 제시한 수문기상학적 PMP와 비교하고자 하였다. 이때, PMP와의 비교를 위해 본 연구에서 해수면온도 증가에 따라 생성된 최대강우량을 MP (Maximum Precipitation)으로 정의하였다.

3. 연구결과 및 분석

3.1 총 강우량에 미치는 영향

MP 산정에 앞서 해수면온도의 증가가 태풍강우에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 5a에 나타난 바와 같이, 도메인 3에서 발생한 총 강우량(D03, mm)의 변화와 도메인 3 내의 육지에 발생하는 강우량(LAND, mm)의 변화를 구분하여 살펴보았다.

Table 2. Numerical Simulation Cases with Sea Surface Temperature

Case	Sea surface temperature	Relative humidity	Case	Sea surface temperature	Relative humidity
Reproduction	original condition	original condition	SST 2.5	+ $2.5^{\circ}C$	100 %
SST 0.0	original condition	100 %	SST 3.0	+ $3.0^{\circ}C$	100 %
SST 0.5	+ $0.5^{\circ}C$	100 %	SST 3.5	+ $3.5^{\circ}C$	100 %
SST 1.0	+ $1.0^{\circ}C$	100 %	SST 4.0	+ $4.0^{\circ}C$	100 %
SST 1.5	+ $1.5^{\circ}C$	100 %	SST 4.5	+ $4.5^{\circ}C$	100 %
SST 2.0	+ $2.0^{\circ}C$	100 %	SST 5.0	+ $5.0^{\circ}C$	100 %

(a) D03 and LAND

(b) Accumulated precipitation

Fig. 5. Comparison of Accumulated Rainfall Depth with Sea Surface Temperature Increase on D03 and LAND

그 결과, 도메인 3 전체에서 발생한 강우량은 해수면 증가에 따라 점차적으로 증가하는 패턴을 나타냄을 확인할 수 있었다. 태풍 최대화 기법을 적용하지 않은 경우(Reproduction) 도메인 3 내에 평균 90.0 mm의 강우가 발생하였으며, 해수면 온도를 증가시키지 않고 상대습도만 100 %로 설정하였을 때 약 169.6 mm로 크게 증가하였다. 그 후, 상대습도 100 %로 고정하고 해수면온도를 0.5 °C에서 5.0 °C까지 점차적으로 증가시키기에 따라 도메인 내에서 모의기간 동안 발생한 총 누적강우량은 176.1 mm에서 245.2 mm까지 일관적으로 증가함을 확인할 수 있었다.

반면, 육지에서 발생한 누적강우량을 분석한 결과는 해수면온도 상승과 일치하는 패턴을 나타내지 않았다. D03과 동일하게 상대습도만을 100 %로 설정하였을 때 누적강우량이 재현 결과(102.2 mm)보다 약 50 % 증가한 155.0 mm로 크게 증가하였다. 그러나 해수면온도를 상승시키기에 따라 오히려 강우량이 감소하는 경우도 나타났다. 특히, 해수면온도를 0.5 °C 또는 1.0 °C 증가시킨 경우(SST 0.5 또는 SST 1.0), 해수면온도를 증가시키지 않은 것보다 강우량이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, SST 4.5와 5.0의 경우 D03과 비교하여 LAND에서 매우 적은 강우가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 공간적 분포 분석

3.1 절에서 나타난 바와 같이 해수면온도를 증가시키에도 불구하고 오히려 강우량이 감소하는 원인을 파악하고자 각 해수면온도 증가결과별로 누적강우량의 공간분포도를 살펴보았다(Fig. 6). 태풍 진행경로를 따라 영남지역을 중심으로 강우가 발생하는 재현 결과(Fig. 6a)와 비슷한 양상을 나타내지만, 전체적인 분포의 형태는 다양하게 나타났다. 특히, 해수면온도의 변화에 따라 최대 강우의 발생 위치와 분포가 변화하고, 해상에 발생하는 강우량이 크게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 상대습도를 100 %로 설정하고 해수면온도를 0.5 °C 증가시킨 경우(Fig. 6c)는 상대습도만 100 %로 설정한 경우(Fig. 6b)와 비교하여 제주도 남쪽 및 일본 부근 해상에 많은 강우가 발생한 반면, 한반도에 발생한 강우는 매우 적은 것을 확인할 수 있다. 해수면온도를 3.5 °C 증가시킨 경우(Fig. 6h)에는 해상에서 발생하는 강우가 증가하였으며, 이와 함께 강원지역을 중심으로 육지에 발생한 강우 또한 증가한 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 해수면온도가 5.0 °C 증가하였을 때(Fig. 6l), 매우 큰 강우가 해상에서 발생하는 반면, 육지에는 상대적으로 적은 강우가 발생함을 확인할 수 있다. 이처럼 강우의 해수면온도의 증가에 따른 해상과 육지에 발생하는 강우의 변화, 즉 공간적인 분포의 변화는 육지의 강우 증가 패턴이 불규칙하게 나타나는 원인이며, 이러한 결과는 물리기반 수치기상모형이 지면과 대기의 상호작용을 반영하기 때문인 것으로 판단된다.

또 하나의 추론은 만일 D03의 공간적인 영역을 북쪽으로

더 이동하여 WRF를 실행하면 더 많은 강우가 한반도 남부지방에 내릴 것이라는 가설이다. 그러나 도메인의 이동을 통한 강우의 공간분포 변화시도는 지나치게 작위적으로 강우의 공간분포를 모의하게 되는 결과가 되어 현실적인 강우의 공간분포를 재현하기 어렵게 됨을 살펴볼 수 있었다. 또한, 태풍의 경로 또한 기존 경로와는 다른 방향으로 전개되기 때문에 가능한 적절한 해양 지역을 포함한 D03의 공간적인 영역을 설정하는 것이 더 바람직 할 것이라 판단되었다.

3.3 지점 강우량에 미치는 영향

본 연구에서는 해수면온도가 특정 지점 강우량에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 태풍 매미의 주요 피해 지역인 영남지역 중 부산에 대해 영향면적 27 km² 지속기간별 MP를 산정하였다(Table 3). 등지 격자 시스템 방식을 이용한 모의 결과는 저해상도의 입력 자료로부터 생성되기 때문에, 해당 지역에 이를 이용하여 MP를 산정하기에는 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 부산 지역 주위의 격자 대상으로 해수면온도 증가 시나리오별로 최대강우 발생 격자를 탐색하여 MP를 추정하였다. 또한, 산정된 MP를 Lee et al. (2016)에서 수문기상학적 방법을 통해 산정된 PMP와 비교하였다. 해당 연구에서는 지속기간 1, 2, 4, 6, 8, 12, 18, 24, 48, 72-시간에 대하여 PMP를 영향면적 별로 제시하고 있으며, 영향면적 27 km²의 MP와 비교를 위해 PMP에 대해 선행보간을 수행하였다.

그 결과, 지점의 MP 또한 해수면온도의 상승에 비례하지 않는 것으로 나타났다. 해수면온도 증가에 따라 MP가 일정하게 증가하지 않으며, 지속기간에 따라서도 해수면온도 증가가 MP의 결과에 미치는 영향이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 예를 들어, 짧은 지속기간(8-시간 이하)에서는 해수면온도를 4.0 °C 증가시켰을 때(SST 4.0)보다 2.0 °C 증가시켰을 때(SST 2.0) 더 큰 MP를 나타내지만, 긴 지속기간(12-시간 이상)에서는 이와 반대로 SST 4.0이 SST 2.0보다 더 큰 MP를 나타낸다.

이 또한 지면과 대기의 복잡한 상호작용이 반영되어 지역적인 강우에 대한 시공간적 분포의 변화에 따른 결과로 판단된다. 따라서 물리기반 수치기상모형을 이용하여 해수면온도 증가를 통해 특정 지역의 MP를 산정하기 위해서는 다양한 수치실험을 통해 최적의 해수면온도 증가량을 탐색할 필요가 있다.

3.4 MP 산정 결과

앞서 본 연구에서 최대 강우량 생산을 위한 최적의 해수면온도 증가량을 산정하기 위해 수문기상학적 PMP 산정방법을 참고하여 유도한 3.0 °C의 해수면온도 증가량을 적용하였을 때, 모든 지속기간에 대해 가장 큰 MP 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7은 지속기간 12-시간에 대한 해수면온도 증가량별 MP와 PMP를 그래프로 나타낸 것

Fig. 6. Comparison of Spatial Distribution According to Change Amount of Sea Surface Temperature (Relative Humidity 100 %)

Table 3. 27 km² PMP and MP for Each Duration at Busan

Duration (hour)	1	2	4	6	8	12	18	24	48	72
PMP (mm)	171.9	279.3	451.5	567.8	634.0	726.7	874.4	993.3	1,055.8	1,059.4
MP (mm)	SST 0.0	76.7	141.0	265.1	374.4	444.4	664.8	811.4	859.7	879.4
	SST 0.5	78.5	122.6	175.4	245.1	303.2	428.5	560.1	606.0	614.8
	SST 1.0	73.6	124.8	241.7	320.8	378.0	545.9	639.5	710.4	723.8
	SST 1.5	69.7	136.5	244.8	349.6	427.7	609.1	702.2	754.8	782.8
	SST 2.0	112.8	194.2	377.9	472.1	527.3	646.1	726.6	788.4	810.9
	SST 2.5	70.3	128.2	206.5	246.3	284.7	424.3	521.4	574.8	597.1
	SST 3.0	157.6	265.2	452.4	563.1	707.5	897.6	979.9	1,036.9	1,094.1
	SST 3.5	104.6	190.0	348.2	471.5	602.3	741.8	839.4	906.7	970.2
	SST 4.0	76.8	145.1	289.5	395.3	517.6	698.5	755.0	796.7	842.0
	SST 4.5	123.5	239.4	385.5	574.9	641.1	740.9	855.1	884.5	926.6
	SST 5.0	97.3	171.4	284.8	360.5	411.5	481.4	568.6	603.5	650.6

이다. 해수면온도를 3.0 °C 증가시킨 경우(SST 3.0)의 MP가 897.6 mm로 가장 크게 모의되어 기존 PMP (726.7 mm) 보다 약 23.5 % 증가되었음을 확인할 수 있으며, SST 3.5에서 두 번째로 큰 MP (741.8 mm)가 산정되었다. 또한, SST 4.5에서는 MP가 740.9 mm로 기존 수문기상학적 PMP와 가장 유사하게 나타났다. 그러나 이를 제외한 대부분의 경우에 MP가 PMP 보다 적은 결과를 나타내었다.

Fig. 7. Comparison of PMP and MPs at Busan

물리기반의 수치기상모형을 이용할 경우, 시간간격에 따른 누적강우량이 모의되기 때문에 지속기간별 총 강우량뿐만 아니라 시간별 강우강도를 계산하여 더 현실적인 우량주상도를 작성할 수 있다. Fig. 8은 가장 큰 MP를 나타내는 SST 3.0의 경우에 대한 부산지점의 영향면적 27 km²의 공간평균 강우시계열(막대그래프)과 지속기간별 누가강우량(선그래프)을 나타낸 것이다.

Fig. 8. Estimation of Hourly MP Under SST 3.0 at Busan

4. 결 론

본 연구에서는 WRF 모델을 이용하여 태풍 매미를 대상으로 상대습도 100 %와 함께 해수면온도를 0.0 °C에서 5.0 °C까지 증가시켜, 해수면온도가 태풍강우 최대화에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 최종적으로 부산지역의 영향면적 27 km²의 지속기간별 MP를 산정하였으며 이를 기존의 수문기상학적 방법으로 산정된 PMP와 비교하였다.

해수면온도의 증가에 따른 도메인 내에 발생한 총 강우량과 육지에서 발생한 총 강우량을 분석한 결과, 도메인 내에서 발생한 총 강우량과 달리 해수면온도의 증가와 육지에 발생한 총 강우량 사이의 관계는 명확하지 않았다. 물리기반 수치기상모형을 이용하는 경우, 지면과 대기의 복잡한 상호작용이 반영되기 때문에 강우의 공간적인 분포가 해수면온도에 따라 크게 변화하며, 이는 해수면온도의 증가에도 불구하고 육지에서 발생하는 강우가 감소하는 원인이 된다. 즉, 해수면온도를 크게 증가시킨다고 하더라도 이는 특정 지역에서 발생하는 강우가 의도한 바와 같이 크게 증가하지는 않을 것이라는 것을 의미한다. 시공간적인 강우분포의 변화

에 따라 부산지점의 MP의 결과 또한 해수면온도 상승 및 지속기간에 따라 MP 산정 값에 일반적인 패턴을 나타내지 않아 강우 분포의 변화는 지역적인 극한강우 추정에도 영향을 미치는 것으로 나타났다.

수문기상학적 PMP 산정방법을 참고하여 산정된 해수면온도 변화량인 3.0 °C를 적용하였을 경우 모의된 MP는 영향면적 27 km² 지속기간 12-시간에서 이에 대응하는 PMP 보다 약 23.5 % 큰 897.6 mm로 모의되었다. 본 연구에서 적용한 태풍강우 최대화 방법의 적용은 기존의 PMP 산정방법의 문제점을 개선하고 물리적인 강우의 상한을 모의하는데 도움이 될 것으로 기대된다. 또한, 총 강우량뿐만 아니라 강우의 시간분포를 생산할 수 있어 큰 규모의 수공 구조물의 설계뿐만 아니라, 거대 재난 발생 시 시간별 침수피해의 예상과 같은 재난대응 시나리오로서의 기능도 기대해볼 수 있을 것이다.

그러나 앞서 강우의 시공간적인 분포의 변화가 미치는 영향으로 미루어 보았을 때, 조건 변화에 따라 강우의 분포는 크게 변화하며, 이로 인해 MP의 결과 또한 변경될 가능성이 있다. 본 연구에서 이슬점을 고려하여 유도한 해수면온도 변화량을 적용하여 가장 큰 MP가 산정된 것은 우연적인 일치의 가능성이 있음을 의미한다. 따라서 다양한 강우사상에 대해 동일한 방법을 통해 추가적인 검증이 필요할 것이다.

그러므로 물리 기반 수치기상모형을 통하여 유역과 같은 지역적인 극한강우를 생산하기 위해서는 무조건적인 해수면온도의 증가 또는 특정 값을 반영하기보다 다양한 증가값을 적용하여 수치실험을 통해 강우의 공간분포를 고려하여 합리적인 증가량을 탐색할 필요가 있고 판단된다. 또한 상대습도 및 해수면온도뿐만 아니라, 기온 및 풍속과 같이 태풍강우에 영향을 미치는 다양한 기상변수가 있기에 이러한 요소를 고려하여 태풍강우 최대화 기법을 개선해 나갈 필요가 있다. 추가적으로 본 연구의 태풍강우 최대화 기법에 기후변화 시나리오를 적용한 연구 또한 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임[MOIS-재난-2015-03].

References

Abbs, D.J. (1999). A numerical modeling study to investigate the assumptions used in the calculation of probable maximum precipitation. *Water Resources Research*, Vol. 35, pp. 785-796.

Choi, J., Lee, J., Jeong, H., Jang, J., and Kim, S. (2018). Effect of improvement of initial and boundary

conditions in WRF model on simulating typhoon rainfall. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 2, pp. 445-454 (in Korean).

Ishida, K., Kavvas, M.L., Jang, S., Chen, Z.Q., Ohara, N., and Anderson, M.L. (2015a). Physically based estimation of maximum precipitation over three watersheds in Northern California: Atmospheric boundary condition shifting. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 20, No. 4, 04014052.

Ishida, K., Kavvas, M.L., Jang, S., Chen, Z.Q., Ohara, N., and Anderson, M.L. (2015b). Physically based estimation of maximum precipitation over three watersheds in Northern California: Relative humidity maximization method. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 20, No. 10, 04015014.

Ishida, K., Ohara, N., Kavvas, M.L., Chen, Z.Q. and Anderson, M.L. (2018). Impact of air temperature on physically-based maximum precipitation estimation through change in moisture holding capacity of air. *Journal of Hydrology*, Vol. 556, pp. 1050-1063.

Laliberte, F., Zika, J., Mudryk, L., Kushner, P.J., Kjellsson, J., and Döös, K. (2015). Constrained work output of the moist atmospheric heat engine in a warming climate. *Science*, Vol. 347, No. 6221, pp. 540-543.

Lee, J., Choi, J., Lee, O., Yoon, J., and Kim, S. (2017). Estimation of probable maximum precipitation in Korea using a regional climate model. *Water*, Vol. 9, No. 4, Article No. 240.

Lee, O., Park, Y., Kim, E.S., and Kim, S. (2016). Projection of Korean probable maximum precipitation under future climate change scenarios. *Advances in Meteorology*, Vol. 2016, 3818236.

Lee, S.S. and Chang, E.M. (2009). Application of GIS to typhoon risk assessment. *The Journal of GIS Association of Korea*, Vol. 17, No. 2, pp. 243-249 (in Korean).

NIMR (National Institute of Meteorological Research). (2009). *Understanding Climate Change II*. Climate change on the Korean peninsula: Present and future, National Institute of Meteorological Research, pp. 46-69 (in Korean).

Ohara, N., Kavvas, M.L., Kure, S., Chen, Z.Q., Jang, S., and Tan, E. (2011). Physically based estimation of maximum precipitation over American river watershed, California. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 351-361.

Papalexiou, S.M., and Koutsoyiannis, D. (2006). A

probabilistic approach to the concept of probable maximum precipitation. *Advanced in Geosciences*, Vol. 7, pp. 51-54.

Ryu, M.H., and Cho, S.K. (2010). A study on national economic impact by natural disaster: A case of typhoon. *Productivity Review*, Vol. 24, No. 3, pp. 273-290 (in Korean).

Tsuboki, K., Yoshioka, M.K., Shinoda, T., Kato, M., Kanada, S., and Kitoh, A. (2015). Future increase of supertyphoon intensity associated with climate change. *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, No. 2, pp. 646-652.

WMO (World Meteorological Organization). (1986). *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation*. Geneva.

WMO. (2012). *The second assessment report on the influence of climate change on tropical cyclones in the typhoon committee region*. ESCAP/WMO Typhoon Committee.

Received	September 27, 2018

Revised	October 1, 2018

Accepted	October 19, 2018